

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO

AUGUSTO FONTAN MOURA

ANÁLISE DA TROCA DE CALOR EM SISTEMAS DE INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS – UM ESTUDO DE CASO: POLIPROPILENO

Guaratinguetá
2011

AUGUSTO FONTAN MOURA

ANÁLISE DA TROCA DE CALOR EM SISTEMAS DE INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS – UM ESTUDO DE CASO: POLIPROPILENO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

Guaratinguetá
2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

ANÁLISE DA TROCA DE CALOR EM SISTEMAS DE INJEÇÃO DE
TERMOPLÁSTICOS – UM ESTUDO DE CASO: POLIPROPILENO

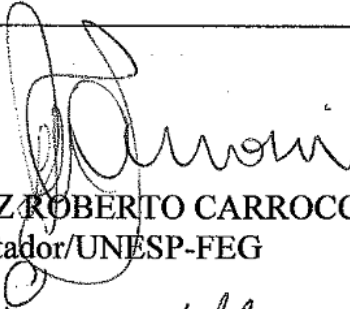
AUGUSTO FONTAN MOURA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

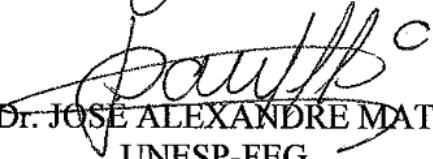
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador


BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
UNESP-FEG



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

Moura, Augusto Fontan

M929a Análise da troca de calor em sistemas de injeção de termoplásticos – um estudo de caso: polipropileno / Augusto Fontan Moura – Guaratinguetá : [s.n], 2011.

50 f : il.

Bibliografia: f. 50

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

1. Calor - transmissão 2. Polipropileno I. Título

CDU 536.24

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a *Deus*, causa primária e inspiração para seguir em frente,
ao meu orientador, *Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci*, por todo o apoio e pela orientação que me pôs no caminho certo,
aos meus pais, *Paulo e Dolores*, pelo incentivo aos estudos mesmo nos momentos mais difíceis,
a minha irmã, *Mariana*, por sempre iluminar um pouco mais todos os meus passos,
ao departamento de manutenção da Plastic Omnium do Brasil, principalmente a *Raul Rezende e Marcelo Gonçalves*, pelo auxílio na coleta de dados, principalmente em situações onde sua obtenção era difícil, e no entendimento do processo de injeção como um todo.

“Todos estes que aí estão
Atravancando meu caminho
Eles passarão...
Eu passarinho!”

Mário Quintana

MOURA, A. F. **Análise da troca de calor em sistemas de injeção de termoplásticos – Um estudo de caso: polipropileno.** 2011. 50 f. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

O objetivo do trabalho foi definir os processos com que ocorre o resfriamento de peças termoplásticas dentro da cavidade do molde em um processo de injeção. Os materiais plásticos tornam-se cada vez mais proeminentes na indústria automobilística e, entre os processos de fabricação, a injeção por moldagem desenvolve-se rapidamente, permitindo a fabricação de peças de qualidade e em grande volume produção. Foram coletados dados da injeção do pára-choque dianteiro do Volkswagen Gol NF 23X (Gol Geração 5). Utilizando-se métodos aproximados de cálculo para a troca de calor dentro do molde, no sistema de refrigeração, foi calculada a vazão de água requerida para resfriar adequadamente à peça. Comparando-se o valor obtido com as especificações de projeto, constatou-se que o método, embora incorra em erros, é eficaz na determinação da vazão requerida de fluido refrigerante e serve para aferir parâmetros definidos em projeto, e pode ser aplicado a projetos simples. A definição do sistema de refrigeração, na prática, é regido por inúmeras variáveis e cada caso deve ser abordado exclusivamente, uma vez que os parâmetros que se adéquam a um caso podem não ser ideais a outro.

PALAVRAS-CHAVE: Transferência de calor. Injeção plástica por moldagem. Moldes. Polipropileno.

MOURA, A. F. **Heat exchange analysis in thermoplastics injection systems – A case study:** polypropylene. 2011. 50 f. Monograph (Undergraduate work in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The purpose of this work was to define the processes through which the cooling of thermoplastics parts occur inside the mold cavity in an injection process. The plastic materials have become more widespread in the automobile industry and, among its manufacturing processes, injection moulding develops quickly, allowing the manufacturing of quality parts in great volumes. Data was collected from the injection of Volkswagen Gol NF 23X (Gol Generation 5). Using approximated methods for calculation for the heat Exchange inside the mould, in the cooling system, the required water flow was determined to properly cool the parts. Comparing the obtained value with Project specifications, it was verified that the method, in spite of incurring in some mistakes, is efficient in determining the flow of cooling fluid and serves as a verification tool for the parameters defined on project, and can be applied to simple projects. The definition of the cooling system, in practice, is dependent on innumerable variables and each case must be approached in itself, since the parameters for one product may not be ideal for another.

KEYWORDS: Heat exchange. Plastic injection molding. Moulds. Polypropylene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplo de máquina injetora e seus componentes (http://www.demet.ufmg.br/docentes/rodrigo/processamento.htm)	13
Figura 2. Exemplo de molde de duas placas e seus componentes (MANRICH, 2005)	14
Figura 3. Projeção no aumento de produção de veículos leves, no Brasil, para 2011.	17
Figura 4. Projeção de produção de veículos no Brasil até 2016.....	18
Figura 5. Faturamento da indústria de autopeças em bilhões de R\$ e US\$	18
Figura 6. Estimativa do número de postos de trabalho na indústria de autopeças	19
Figura 7. Relação entre a cotação R\$/US\$ e as importações da indústria de autopeças	19
Figura 8. Efeito Weissenberg e efeito sifão em polímeros viscoelásticos. (MANRICH, 2005).....	21
Figura 9. Comportamento dos polímeros sob deformação. (MANRICH, 2005).....	22
Figura 10. Proporcionalidade entre tensão e taxa de cisalhamento. (MANRICH, 2005)	23
Figura 11. Perfil de velocidades devido à diferença de pressão. (MANRICH, 2005).	25
Figura 12. Orientação das moléculas do polímero durante o fluxo. (MANRICH, 2005)	25
Figura 13. Variação da viscosidade em função da temperatura e do cisalhamento. (MANRICH, 2005).....	26
Figura 14. Movimento das moléculas pela teoria da reptação. (MANRICH, 2005)....	26
Figura 15. Curvas de viscosidade para diferentes faixas de taxas de cisalhamento. (MANRICH, 2005).....	27
Figura 16. Exemplos de distribuição de canais de refrigeração ao redor da cavidade e seu efeito na formação da peça injetada. (SANTANA, 2008)	30
Figura 17. Distribuição da temperatura ao redor da cavidade de acordo com a distribuição dos canais de injeção. (SANTANA, 2008)	30
Figura 18. Padrão de construção do sistema de resfriamento de um molde. (Padrão de confeção de moldes)	31
Figura 19. Deformação de uma peça por distribuição não uniforme do calor na cavidade. (SANTANA, 2008)	31
Figura 20. Gradiente de temperaturas em escoamento turbulento e laminar. (SANTANA, 2008)	32
Figura 21. Esquema da troca de calor do molde com o fluido refrigerante e o meio- ambiente. (Padrão de confeção de moldes)	33
Figura 22. Esquema da troca de calor entre dois fluidos com um material sólido entre eles. (INCROPERA, 2008).....	34
Figura 23. Pele injetada do Volkswagen Gol NF 23X	45
Figura 24. Máquina injetora Husky de 2700t.....	45
Figura 25. Variação do calor específico do polipropileno para a faixa de temperaturas do processo de injeção.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais polímeros comerciais e sua ocorrência.....	12
Tabela 2. O consumo de plástico dos oito maiores consumidores mundiais, em 1.000 toneladas	17
Tabela 3. Relação entre diâmetros dos canais e vazão do fluido refrigerante	28
Tabela 4. Propriedades térmicas e densidade de materiais utilizados na fabricação de moldes.....	29
Tabela 5. Distância de tubos, entre si e com a cavidade, em função do diâmetro do tubo, em mm.	31
Tabela 6. Exemplos de fator de proporcionalidade para alguns materiais.....	36
Tabela 7. Parâmetros que causam injeções incompletas	37
Tabela 8. Parâmetros que causam superfície opaca	38
Tabela 9. Parâmetros que causam manchas de queimado.....	39
Tabela 10. Parâmetros que causam rechupe ou bolhas	39
Tabela 11. Parâmetros que causam marcas de junção.....	40
Tabela 12. Parâmetros que causam aderência no bico ou na cavidade	40
Tabela 13. Parâmetros que causam marcas oblíquas e linhas prateadas	41
Tabela 14. Parâmetros que causam rebarbas na peça.....	42
Tabela 15. Parâmetros que causam manchas pretas ou degradação da cor.....	42
Tabela 16. Parâmetros que causam deformação ou contrações excessivas	43
Tabela 17. Dados coletados do processo de injeção do NF 23X	46

SUMÁRIO

1	OBJETIVO	11
2	INTRODUÇÃO	11
2.1	BREVE HISTÓRICO DOS MATERIAIS PLÁSTICOS.....	11
2.2	MOLDAGEM PLÁSTICA POR INJEÇÃO	12
2.2.1	A INJETORA	12
2.2.2	O CICLO DE INJEÇÃO	14
2.3	A PLASTIC OMNIUM	15
2.4	O MERCADO DE PLÁSTICOS.....	16
3	MOTIVAÇÃO	19
4	METODOLOGIA	20
4.1	REOLOGIA DO MATERIAL TERMOPLÁSTICO	20
4.1.1	VISCOELASTICIDADE DOS POLÍMEROS.....	20
4.1.2	FLUXO DE POLÍMEROS FUNDIDOS.....	21
4.1.3	TAXA DE CISLHAMENTO	23
4.1.4	VISCOSIDADE.....	24
4.1.5	TEORIA DA REPTAÇÃO.....	26
4.2	O SISTEMA DE RESFRIAMENTO DO MOLDE	27
4.2.1	DIMENSÃO DA TUBULAÇÃO.....	27
4.2.2	POSICIONAMENTO DA TUBULAÇÃO	29
4.2.3	VAZÃO DE FLUIDO REFRIGERANTE	31
4.2.4	O ESCOAMENTO DO FLUIDO REFRIGERANTE NOS CANAIS DE REFRIGERAÇÃO	32
4.3	O PROCESSO DE RESFRIAMENTO	33
4.4	DEFEITOS EM PEÇAS INJETADAS	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1	VOLKSWAGEN 23X – GOL NF.....	44
5.2	A MÁQUINA INJETORA – HUSKY 2700T.....	45
5.3	DADOS DO PROCESSO E DO MATERIAL	46
5.4	DETERMINAÇÃO DAS TROCAS DE CALOR NO MOLDE E DA VAZÃO DO SISTEMA REFRIGERANTE	47
6	CONCLUSÃO.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 OBJETIVO

O trabalho visa definir e entender os processos de resfriamento dentro da cavidade do molde durante a manufatura de peças termoplásticas por injeção. Através de dados coletados em produção real e com auxílio da literatura, objetiva-se mensurar os parâmetros usados para o ideal resfriamento do sistema.

2 INTRODUÇÃO

2.1 Breve histórico dos materiais plásticos

O primeiro contato do homem com materiais poliméricos se deu já na Antiguidade, pelo uso de graxas e resinas pelos egípcios, usados na vedação de vasilhames, carimbos e colagem. Sua utilização, contudo, ficou restrita até o século XIX, quando Charles Goodyear descobriu o processo de vulcanização da borracha, material que já era conhecido desde sua descoberta por colonizadores europeus no século XVI. (CANEVAROLO JÚNIOR, 2006)

Até o final da Primeira Guerra Mundial, as descobertas de novos polímeros, dentre eles nitrocelulose e baquelite, aconteceu por acaso, de maneira experimental. Foi em 1920 que o cientista alemão Hermann Staudinger propôs a teoria da macromolécula, que só veio a ser aceita na comunidade científica décadas mais tarde, conferindo-lhe o Nobel de Química em 1953 (CANEVAROLO JÚNIOR, 2006).

Durante a Segunda Guerra Mundial, com o grande investimento em pesquisa para suprir o esforço de guerra, houve um crescimento considerável no desenvolvimento de materiais poliméricos, pavimentando o caminho para o desenvolvimento nas décadas subsequentes. Principalmente a partir da década de 1970, materiais plásticos se tornaram corriqueiros em uma ampla variedade de usos tornando-se, em 1976, em todas as suas variedades e formas, o tipo de material mais utilizado no mundo. A Tabela 1 demonstra o desenvolvimento e primeiro uso industrial dos principais polímeros utilizados comercialmente hoje.

Na indústria automobilística, plásticos são cada vez mais utilizados pela vantagem que oferecem em termos de redução de peso, auxiliando os objetivos de uma indústria ávida em reduzir o consumo de combustíveis; e pelo custo reduzido das peças plásticas em relação às produzidas em metal. O plástico ainda permite designs complexos através da moldagem, que não são possíveis de se obter em metais em um único processo.

Tabela 1. Principais polímeros comerciais e sua ocorrência (CANEVAROLO JÚNIOR, 2006)

Polímero	1ª Ocorrência	1ª Produção Industrial
PVC	1915	1933
PS	1900	1936
PEBD	1933	1939
PEAD	1953	1955
Nylon	1930	1940
PP	1954	1959

2.2 Moldagem plástica por injeção

2.2.1 A injetora

De acordo com Manrich (2005), a máquina injetora é composta por uma rosca recíproca, capaz de homogeneizar e injetar o polímero fundido, acionada por sistemas mecânicos, elétricos, pneumáticos e/ou hidráulicos. A rosca fica dentro do canhão, que é aquecido por mantas elétricas, transmitindo calor ao polímero. Outro componente, o molde, é o responsável por dar forma ao polímero, que é injetado dentro do molde sob alta pressão e com velocidade controlada. É no próprio molde que ocorre o resfriamento do produto e nele se encontra um sistema de extração para ejetar a peça. A Figura 1 ilustra um exemplo esquemático de máquina injetora.

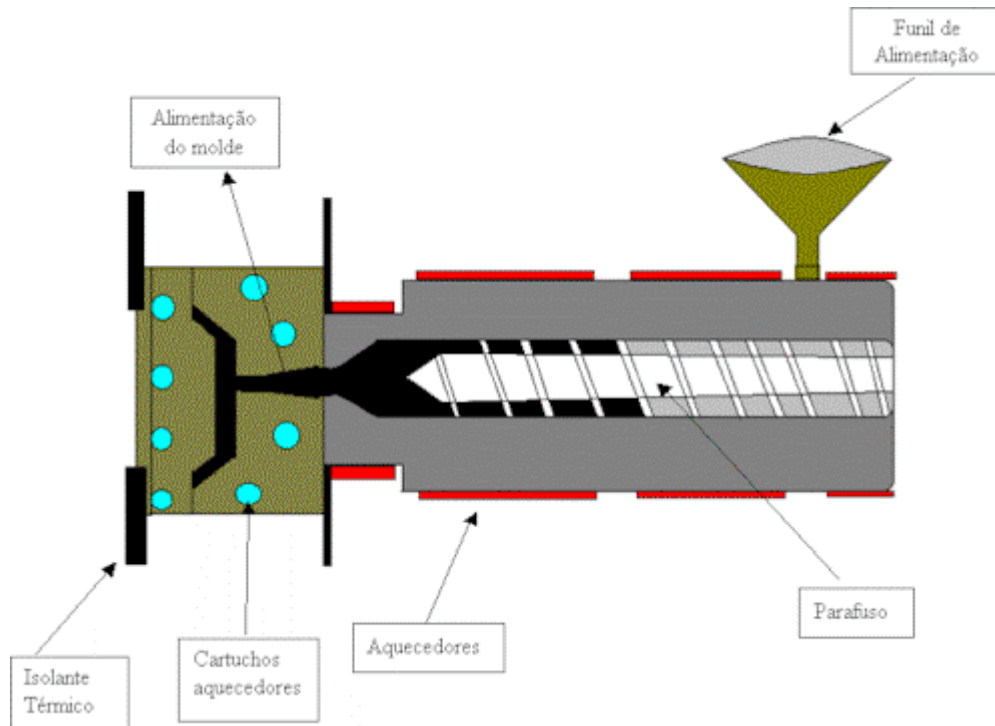


Figura 1. Exemplo de máquina injetora e seus componentes
 (<http://www.demet.ufmg.br/docentes/rodrigo/processamento.htm>)

Quanto aos moldes, Manrich (2005) define dois tipos: os moldes convencionais e com canais quentes (câmaras quentes). O molde é a parte mais complexa do processo de injeção, com projeto complicado. Moldes podem ser de duas ou três placas. Naqueles, uma placa é fixa e a outra móvel, sendo essa última normalmente responsável pela ejeção da peça. No de três placas, há uma placa intermediária que promove tanto a ejeção quanto a separação da peça dos canais de injeção. Assim, o molde é composto por placas, macho e fêmea, que dão a forma ao produto e aos canais.

Os canais, por sua vez, são diversos: canal de injeção, situado logo na entrada do molde; canais de alimentação e de distribuição, que são rasgos nas placas que levam o material à cavidade, e os pontos de injeção, onde o material sofre estrangulamento antes de entrar na cavidade. Por fim, na cavidade, sob pressão, o material é transformado na peça. A Figura 2 ilustra um molde de duas placas com todos os seus componentes

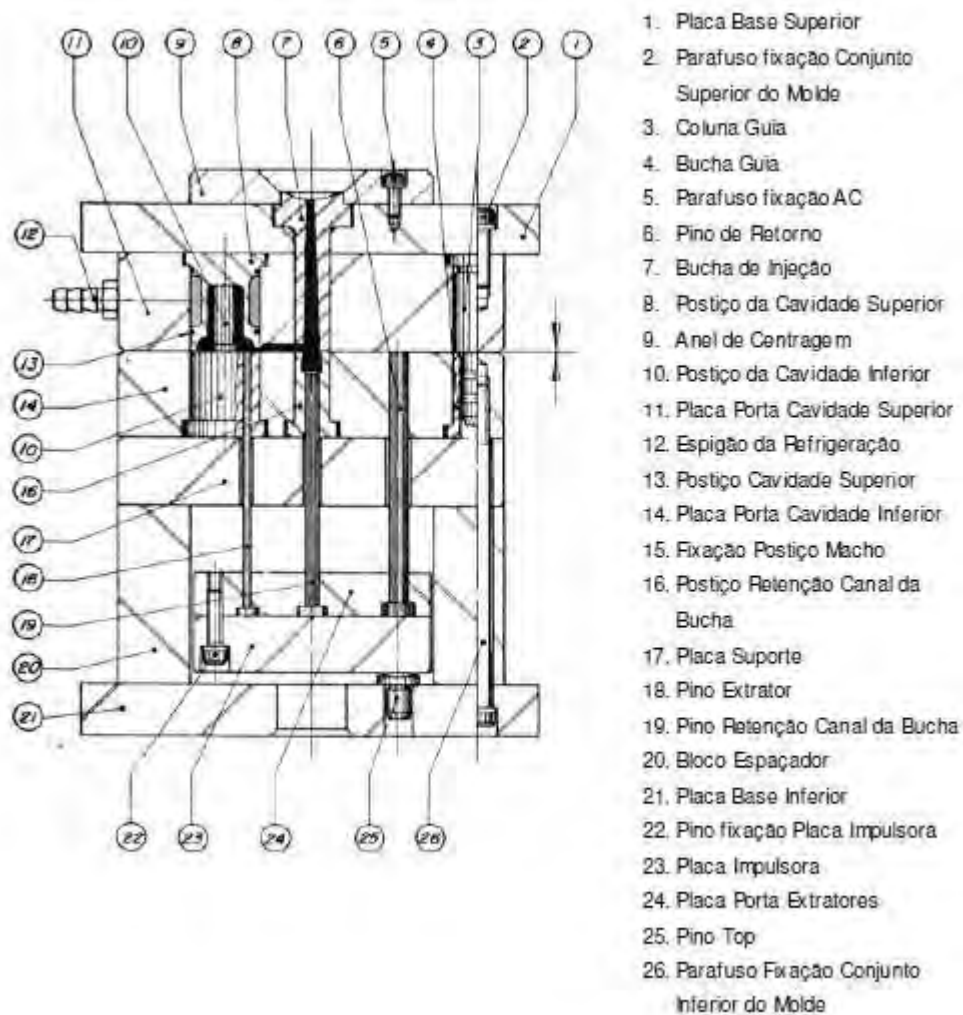


Figura 2. Exemplo de molde de duas placas e seus componentes (MANRICH, 2005)

Ainda de acordo com Manrich (2005), compõem o molde: pinos extratores, que atuam como ejetores da peça, e canais de refrigeração, por onde passam os fluidos que retiram calor do polímero. O sistema de resfriamento será abordado em detalhes no próximo capítulo.

2.2.2 O ciclo de injeção

O ciclo de injeção pode ser definido como “o intervalo total de tempo entre o instante em que o molde se fecha durante um ciclo e o período correspondente em que ele se encerra no ciclo seguinte” (HARADA, 2008). De fato, “a injeção não é um processo contínuo, mas sim intermitente” (MANRICH, 2005), composto pelos ciclos

independentes da rosca e do molde. Manrich (2005) define o ciclo da rosca recíproca como sendo constituído por quatro etapas, sendo:

a) Alimentação do polímero na injetora por um funil de alimentação. O polímero é carregado para frente da injetora pela rosca, que faz a função de um parafuso sem fim. O polímero carregado está pronto para ser injetado.

b) Com o polímero homogeneizado na frente da injetora, a rosca age como pistão, injetando-o no molde.

c) Após injetar, a rosca mantém a pressão durante o chamado tempo de empacotamento ou de recalque.

d) Terminado o recalque, a rosca retorna à etapa (a).

No ciclo do molde, ocorrem outras quatro etapas distintas, que são:

e) Preenchimento, quando o molde encontra-se fechado e completamente vazio para receber o polímero. Nessa etapa já começa o resfriamento do polímero assim que esse entra na cavidade. Depois de completamente preenchido, o molde fica sujeito à pressão de recalque.

f) Resfriamento, que continua após o molde não estar mais sujeito à pressão de recalque.

g) Ejeção da peça, quando ocorre a abertura do molde assim que a peça estiver à temperatura desejada.

h) Fechamento, voltando à etapa (e).

2.3 A Plastic Omnium

A empresa Plastic Omnium corresponde a uma filial brasileira do grupo francês Compagnie Plastic Omnium. O grupo possui, atualmente, operações em 21 países em quatro diferentes continentes, através de 94 complexos industriais, com cerca de 13.740 empregados, 70% destes fora da França. O investimento atual em pesquisa e desenvolvimento chega a 4.8% do lucro total. A empresa se mantém independente e rentável desde sua criação em 1947. A planta brasileira localizada em Taubaté conta atualmente com cerca de 380 empregados. O grupo está dividido em dois ramos de atuação:

- PLASTIC OMNIUM AUTOMOTIVE – corresponde a 82% do lucro do grupo e é composto por Plastic Omnium Auto Exterior e Inergy Automotive Systems.
- PLASTIC OMNIUM ENVIRONMENT – corresponde a 18% do lucro do grupo e é composto por Compagnie Signature, Urban Systems e SULO.

A Plastic Omnium Auto Exterior, divisão a que pertence a planta de Taubaté, especializa-se na injeção e pintura de peças plásticas para o exterior do veículo, como para-choques, módulos traseiros, frisos, spoilers, entre outros. A planta de Taubaté fornece para-choques para os clientes Volkswagen, PSA Peugeot Citroën, Mitsubishi Motor Company e Ford Motor Company.

2.4 O mercado de plásticos

Canevarolo Júnior (2006) apresenta dados de 2002 para o mercado de plásticos no Brasil e no mundo, compilados para os oito maiores consumidores na Tabela 2. Os dados de 2002 demonstram que existiam no Brasil 7.898 empresas no setor plástico, com cerca de 220.000 funcionários. Os dados demonstram, ainda, que cerca de 34% das empresas possuíam quatro empregados, 37% empregavam entre cinco e nove funcionários e 23% entre vinte e cem pessoas. Apenas 5% dessas empresas possuíam mais de 100 funcionários. Esses dados ressaltam a condição de micro e pequenas empresas em que se encontra a maior parte da indústria do setor plástico no país.

De forma mais geral, o mercado automotivo vem apresentando aumento significativo, ano após ano. A projeção para 2011 dita um aumento de 3,6% no volume de veículos leves (veículos de passeio e comerciais leves) sobre 2010, para um total de 1.588.867 veículos produzidos, como ilustrado na Figura 3. Para a produção total de veículos (exceto máquinas agrícolas e motocicletas), projeta-se um aumento de 4,6% para 2011, com produção total de 3.813.453 veículos; e aumento ainda maior para 2012, de 5,9%. A Figura 4 ilustra a projeção de produção até 2016, com aumento previsto, entre 2012 e 2016, de 32,7%.

Tabela 2. O consumo de plástico dos oito maiores consumidores mundiais, em 1.000 toneladas (CANEVAROLO JÚNIOR, 2006)

1) EUA	43.000
2) Alemanha	13.000
3) Japão	11.000
4) Itália	7.000
5) França	5.300
6) Coreia	5.000
7) Inglaterra	4.700
8) Brasil	4.200

Esse aumento impacta diretamente o volume de produção e faturamento do mercado de autopeças e, conseqüentemente, o setor de plásticos. De uma forma geral, prevê-se um aumento de 4,3% no faturamento do setor de autopeças em 2011, num total de R\$90,1 bilhões, como ilustrado na Figura 5. O setor empregava, ao final de 2010, 224.600 funcionários, com projeção de emprego de 225.100 ao final de 2011, conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 3. Projeção no aumento de produção de veículos leves, no Brasil, para 2011.

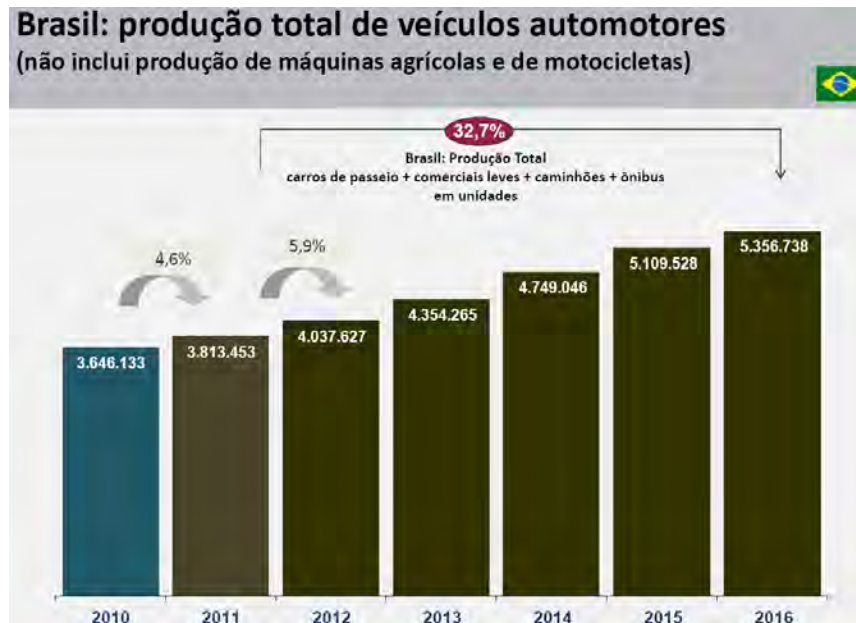


Figura 4. Projeção de produção de veículos no Brasil até 2016

Apesar desses números, a indústria de autopeças enfrenta déficit na balança comercial, principalmente pela baixa do dólar que permitiu a entrada de maior número de produtos importados no mercado nacional. A relação entre o volume de peças importadas e a cotação do dólar frente ao real está ilustrada na Figura 7. Observa-se que, a partir de maio de 2007, com a queda acentuada do dólar, o mercado foi inundado por importações. Todos os dados foram fornecidos por Rugitsky (2011).

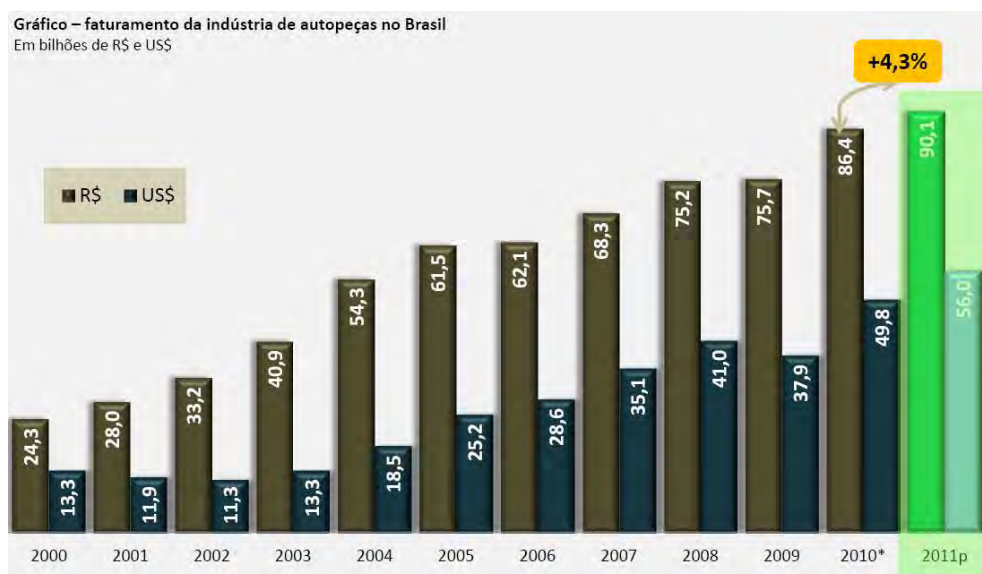


Figura 5. Faturamento da indústria de autopeças em bilhões de R\$ e US\$



Figura 6. Estimativa do número de postos de trabalho na indústria de autopeças

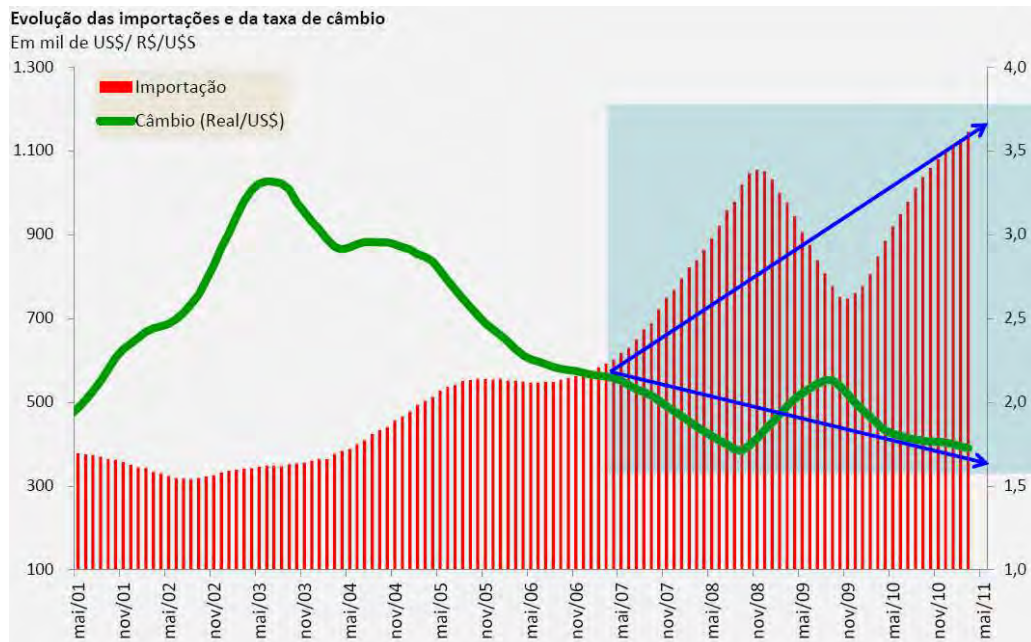


Figura 7. Relação entre a cotação R\$/US\$ e as importações da indústria de autopeças

3 MOTIVAÇÃO

O resfriamento correto é de extrema importância em processos de injeção plástica por moldagem e há uma série de defeitos que podem ser causados por parâmetros inadequados. Por esse motivo, é necessário que se tenha o controle do processo de resfriamento e das temperaturas envolvidas. Como o tempo de resfriamento é responsável pela maior parte do tempo total de um ciclo de injeção, o controle desses parâmetros garante qualidade e produtividade.

4 METODOLOGIA

4.1 Reologia do material termoplástico

A reologia estuda o fluxo da matéria e sua deformação. Todos os materiais fluem de forma mais ou menos fácil, requerendo diferentes quantidades de energia e tempo para fluírem ou se deformarem. Materiais podem ser classificados como elásticos, viscosos, viscoelásticos ou viscoinelásticos. Os polímeros, de forma geral, são materiais viscoelásticos. (MANRICH, 2005)

Quando aplicada uma força ou tensão, ou seja, uma energia externa, a matéria flui. A água, por exemplo, flui imediatamente devido ao seu baixo tempo de relaxação ($t^* = 10^{-12} s$), ou seja, o tempo que a força aplicada leva para decair completamente. No polímero fundido, situação em que é normalmente processado, o tempo de relaxação é consideravelmente maior, da ordem de 10^{-2} a 10 segundos. (MANRICH, 2005)

Manrich (2005) define três tipos de deformações:

- a) por cisalhamento simples, onde a deformação se dá pela mudança de forma, sem alteração de volume;
- b) por compressão ou dilatação, onde ocorre variação de volume, e não de forma, devido a uma tensão normal;
- c) combinação dos anteriores, pela aplicação de tensões tangenciais e normais simultaneamente.

4.1.1 Viscoelasticidade dos polímeros

Viscoelasticidade é o comportamento do material que, quando sofre deformação, apresenta simultaneamente comportamento viscoso, ou seja, não se recupera da deformação após a retirada da tensão; e comportamento elástico, ou seja, recupera-se totalmente da deformação após a retirada da tensão. Esse comportamento é extremamente importante na seleção de polímeros para uma determinada aplicação ou processo. (MANRICH, 2005)

Os efeitos viscoelásticos em um polímero apresentam-se mais ou menos intensamente de acordo com sua estrutura molecular. Observa-se, por exemplo, o efeito Weissenberg, em que o fluido sobe uma haste giratória, devido a tensões normais, em vez de ser repelido pela força centrífuga. Ou o efeito sifão, em que o fluxo se mantém mesmo que o tubo seja elevado acima do nível do fluido. (MANRICH, 2005)

A Figura 8 ilustra esses exemplos.

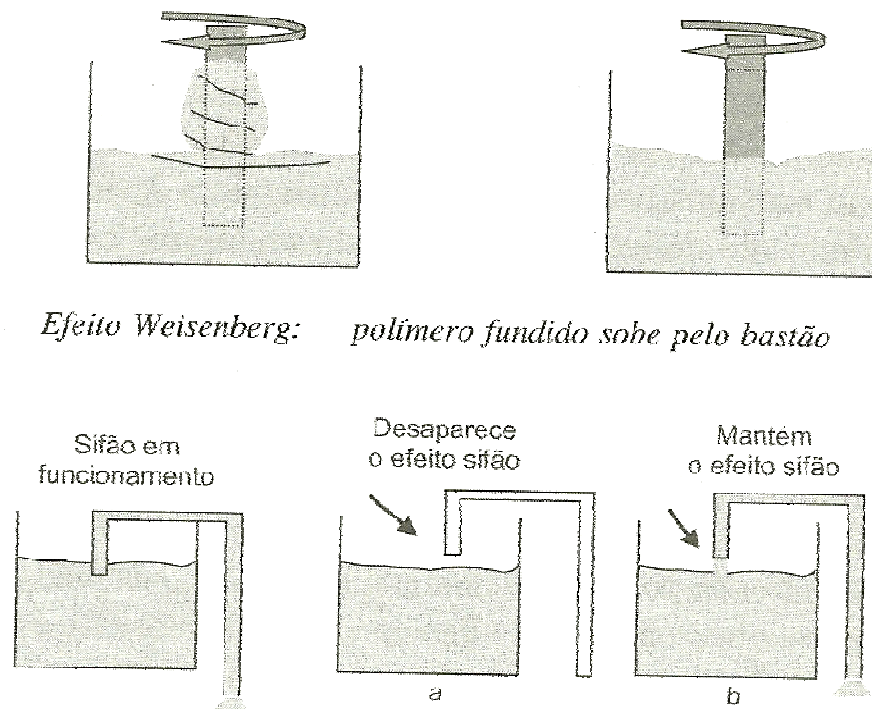


Figura 8. Efeito Weissenberg e efeito sifão em polímeros viscoelásticos. (MANRICH, 2005)

4.1.2 Fluxo de polímeros fundidos

Energia aplicada ao material polimérico, na forma de tensão normal (σ) ou tangencial (τ), gera deformações alongacionais (ϵ) ou cisalhantes (γ), respectivamente. A viscosidade é definida como a resistência do material à deformação e é um fator de proporcionalidade entre a energia (tensão) e a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$ ou $\dot{\gamma}$), como ilustra a Figura 9.

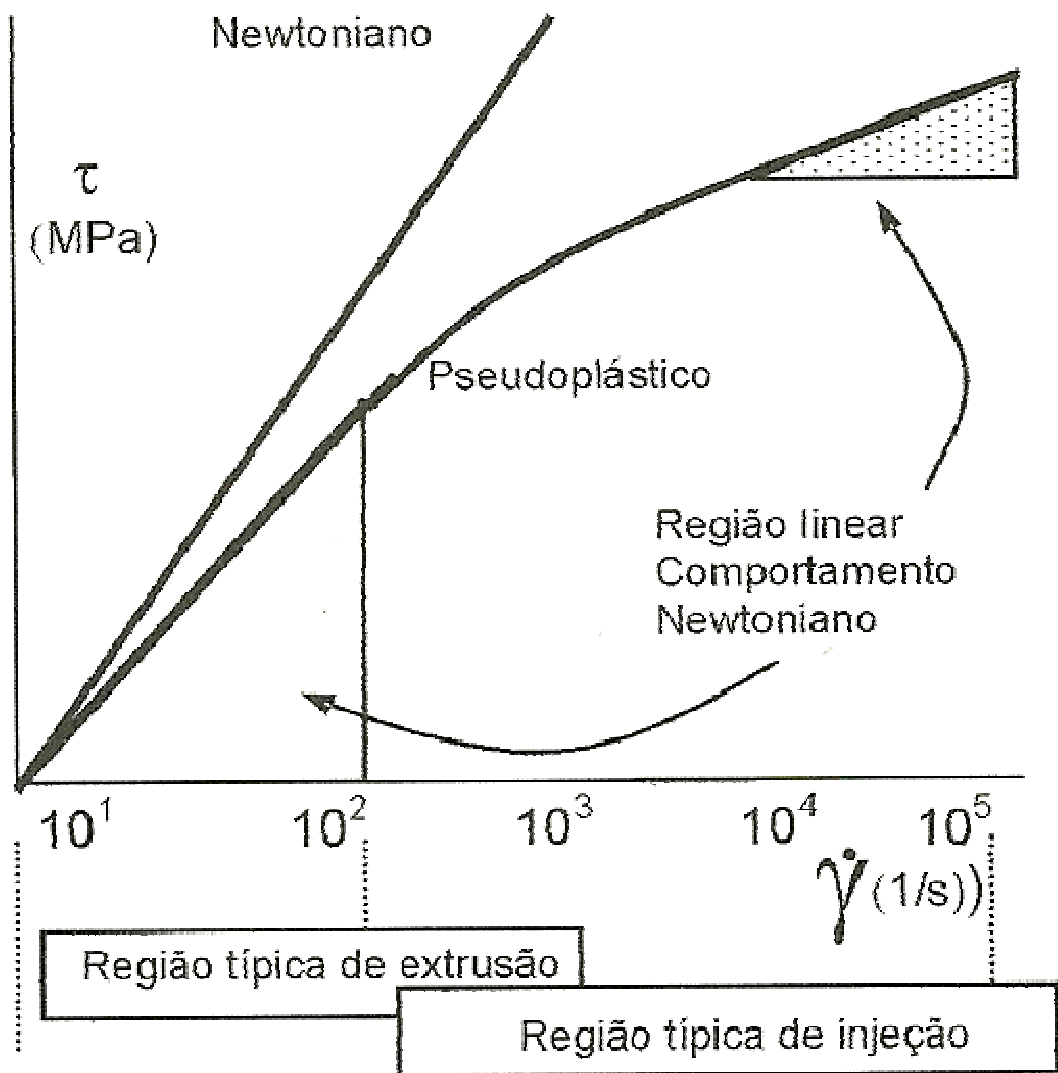


Figura 9. Comportamento dos polímeros sob deformação. (MANRICH, 2005)

Se a tensão tangencial é linearmente proporcional à taxa de deformação cisalhante ($\dot{\gamma}$), seu comportamento é newtoniano. Nesse caso, a viscosidade η é constante para diferentes tensões. Quando a viscosidade diminui com o aumento da tensão aplicada, o polímero tem comportamento pseudoplástico. A maioria do polímero se comporta como pseudoplásticos, mas, a taxas de cisalhamento baixas ou muito elevadas, assumem comportamento newtoniano. O escoamento de polímeros em processos ocorre geralmente em regime laminar. (MANRICH, 2005)

4.1.3 Taxa de cisalhamento

Manrich (2005) define a taxa de cisalhamento como a “variação da velocidade das camadas em relação à distância entre essas camadas”, ou como “o quanto o fluido deforma durante um tempo fixo”. É definido na equação (1):

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dy} = [s^{-1}] \quad (1)$$

A equação (1) define a taxa de cisalhamento como sendo a variação da deformação cisalhante no tempo ($d\gamma/dt$), ou como a variação da velocidade na distância transversal (dv/dy), como representado na Figura 10.

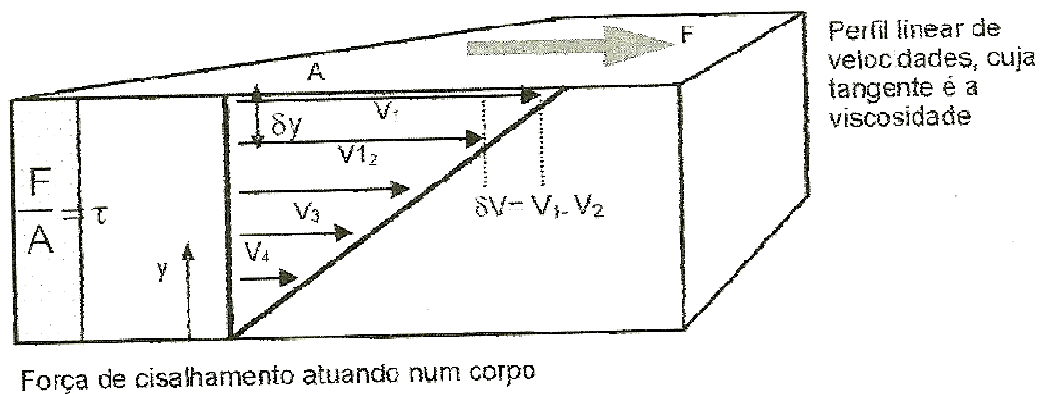


Figura 10. Proporcionalidade entre tensão e taxa de cisalhamento. (MANRICH, 2005)

Como mencionado em 4.1.2, e que será mais detalhado adiante, a taxa de cisalhamento se relaciona com a tensão de cisalhamento através da viscosidade, segundo as equações (2) e (3). A equação (2) representa a relação quando o fluido é newtoniano (viscosidade constante) e a equação (3) apresenta a relação quando o fluido é não-newtoniano. De acordo com Manrich (2005), o segundo caso segue a lei das potências.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

$$\eta = \eta_0 \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

Nesse segundo caso, η_0 é a consistência e n é o fator de potências. Quando n é menor que um, o comportamento do fluido é não-newtoniano.

Em canais de seção reta não uniforme, onde há convergência do fluxo, também há ocorrência de viscosidade tensional, que existe toda vez que o polímero fundido sofre deformação causada por tensões normais. Essa viscosidade é dada por $\lambda = \sigma / \dot{\epsilon}$ e é constante para alguns polímeros, na ordem de três vezes a viscosidade. Em alguns casos, chega a 100η .

4.1.4 Viscosidade

Manrich (2005) define a viscosidade como a resistência que um material oferece ao fluxo ou à deformação. Como mencionado em 4.1.2, quando a viscosidade cisalhante diminui com o aumento da tensão, o fluido é dito pseudoplástico, que é o caso para a maioria dos polímeros. Isso se dá pela reorientação das moléculas no sentido do fluxo, diminuindo as interações entre estas e facilitando o escoamento.

A viscosidade diminui de acordo com a estrutura físicoquímica das moléculas, tais como existência de ramificações, grupos polares, peso e distribuição do peso molecular e dos aditivos. A viscosidade varia exponencialmente com a temperatura de acordo com a equação (4), onde η_{ref} é a viscosidade em uma temperatura de referência determinada e b é uma constante que depende do polímero. O comportamento das moléculas é explicado pela Teoria da Reptação, que será abordada na seção 4.1.5.

$$\eta \propto \eta_{ref} e^{-b\Delta T} \quad (4)$$

Para um $b=0,01$, cada 10°C de aumento na temperatura diminuem em 10% a viscosidade. Já um valor de $b=0,1$ causa diminuição de 60% na viscosidade para cada 10°C de aumento na temperatura. (MANRICH, 2005)

O fluxo do polímero em canais apresenta, invariavelmente, diferenças de pressão entre pontos distintos nos canais. Essas diferenças implicam em diferentes viscosidades do polímero nas várias regiões dos canais. Por ação da diferença de pressão entre dois pontos, um polímero escoando entre placas fixas apresenta perfil parabólico de escoamento, como na Figura 11, que pode ser ideal ou deformado. Nesse perfil há variação na taxa de cisalhamento entre a parede, onde é máxima, para o centro, onde é zero. Assim, a viscosidade é mínima nas paredes e máxima no centro. (MANRICH, 2005)

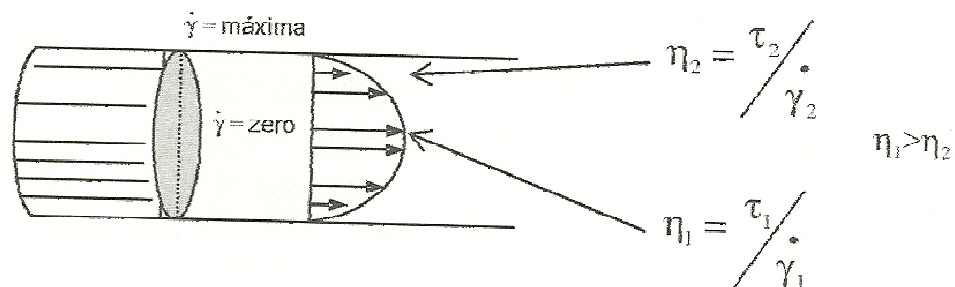


Figura 11. Perfil de velocidades devido à diferença de pressão. (MANRICH, 2005)

A Figura 12 ilustra como as moléculas se orientam durante o fluxo nas diferentes regiões do perfil, de acordo com o grau de cisalhamento. Essas variações na orientação molecular são responsáveis pela alteração da viscosidade.

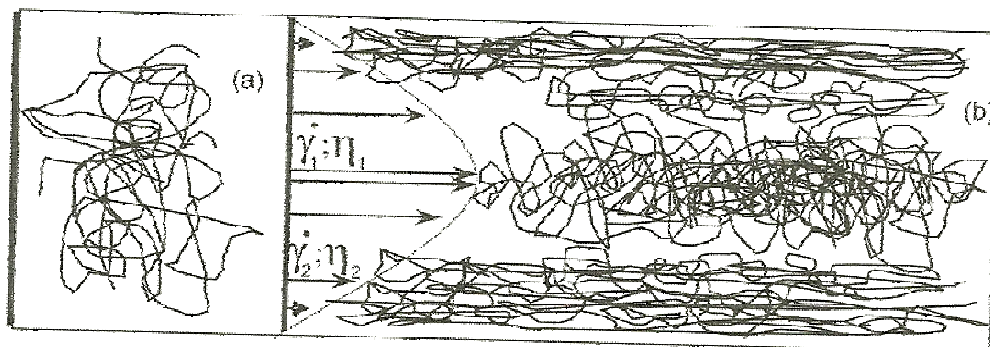


Figura 12. Orientação das moléculas do polímero durante o fluxo. (MANRICH, 2005)

A Figura 13 ilustra a queda da viscosidade em função da temperatura e do cisalhamento. O cisalhamento é o efeito predominante, fazendo com que os valores de da viscosidade do polímero convirjam a valores semelhantes. Essa característica é útil

em processos, tal qual a injeção plástica, onde altas temperaturas degradam o polímero, mas é necessário que estejam com viscosidade baixa. Por exemplo, o preenchimento da cavidade do molde, que possui paredes finas. (MANRICH, 2005)

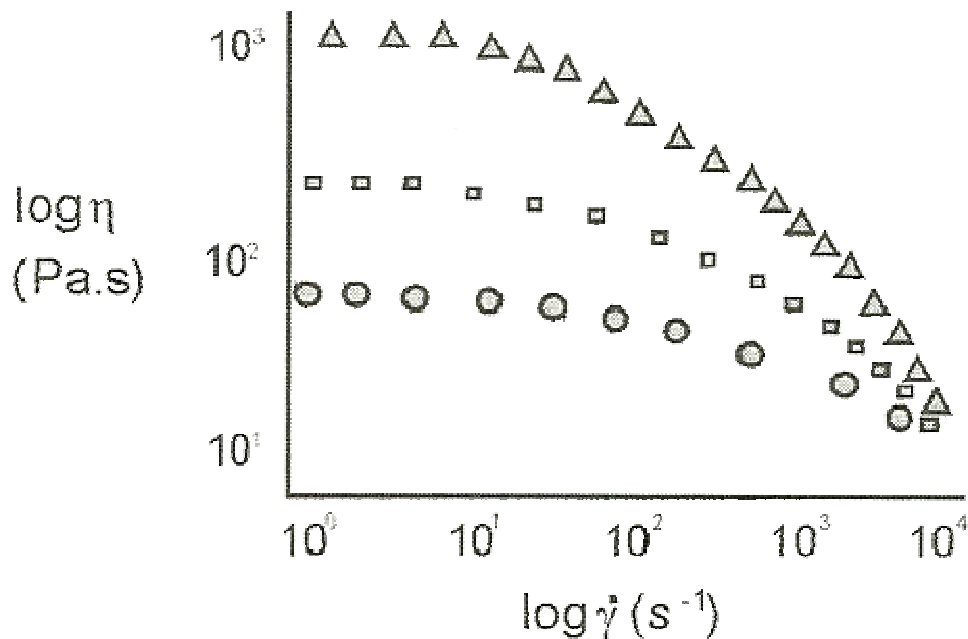


Figura 13. Variação da viscosidade em função da temperatura e do cisalhamento. (MANRICH, 2005)

4.1.5 Teoria da Reptação

A teoria da reptação é a mais difundida e descreve a interação molecular onde não há contato físico entre as moléculas. Cada molécula ocupa um espaço definido pelo equilíbrio entre repulsão e atração. Esses espaços assemelham-se a um tubo onde o movimento da molécula é possível, como ilustrado na Figura 14. A locomoção é mais ou menos fácil em função da estrutura momentânea e das características fisicoquímicas do sistema.



Figura 14. Movimento das moléculas pela teoria da reptação. (MANRICH, 2005)

Moléculas de alto peso molecular, que possuem ramificações, grupos laterais volumosos e ligações covalentes fortes apresentam resistência ao fluxo de forma diferente de moléculas de baixa energia coesiva e densidade. A Figura 15 ilustra curvas de viscosidade para diferentes faixas de taxas de cisalhamento.

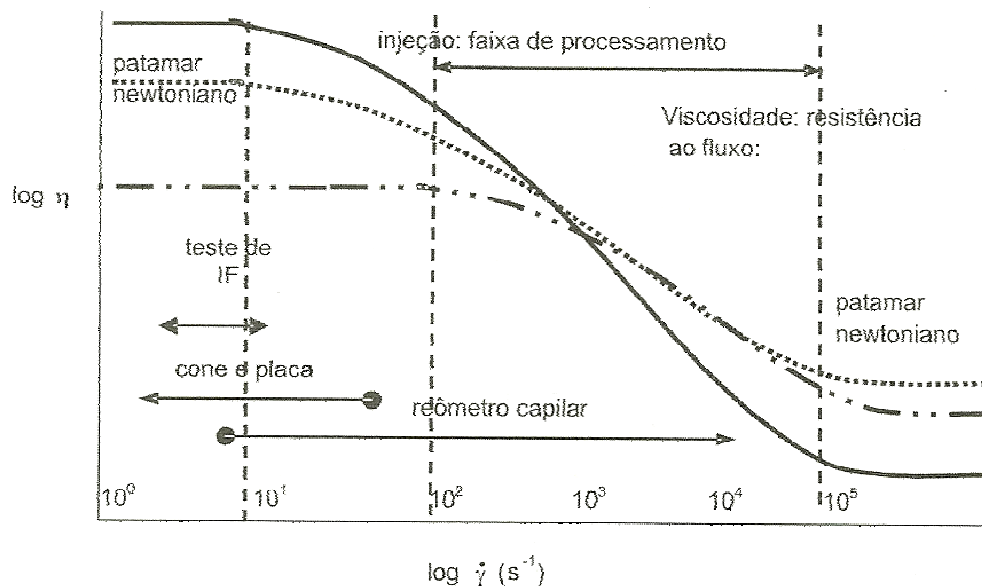


Figura 15. Curvas de viscosidade para diferentes faixas de taxas de cisalhamento. (MANRICH, 2005)

4.2 O sistema de resfriamento do molde

4.2.1 Dimensão da tubulação

O sistema de refrigeração é, de forma geral, a quinta etapa de um projeto de moldes e a mais crítica delas (SANTANA, 2002), uma vez que a refrigeração é a parte mais importante do molde. Para o projeto do molde, deve-se estudar a localização do sistema de refrigeração em função de parafusos de fixação, postigos, etc. Deve-se escolher também o fluido refrigerante. Manrich (2005) define os principais fluidos refrigerantes utilizados: em primeiro lugar, a água, por seu fácil acesso e baixo custo, baixa viscosidade e possibilidade de reciclagem para reuso. Se o molde deve operar em temperaturas superiores a 80°C na cavidade, recomenda-se a utilização de óleo. Para temperaturas muito baixas, abaixo de 3°C, recomenda-se o uso da mistura metanol +

CO₂. Harada (2008) menciona também o resfriamento a ar, para situações em que o uso da água é difícil ou onde se deseja um resfriamento lento.

A refrigeração é feita por meio de canais que podem estar localizados distintamente no molde, atuando diretamente sobre diferentes áreas. Pode-se citar: resfriamento na cavidade, no extrator, no macho e a combinação de refrigeração no macho e na cavidade (SANTANA, 2002).

Os canais de refrigeração “podem ser furados diretamente no molde ou feitos com tubos de cobre alojados neste e envolvidos por uma liga de baixo ponto de fusão” (HARADA, 2008). O resfriamento por furos no molde, por ser mais simples e barato, é o mais usual. Harada (2008) recomenda uma distância mínima de 25 mm entre os furos e a cavidade, uma vez que nas regiões próximas ao furo há grande troca de calor que pode gerar imperfeições e defeitos na peça, tais quais deformações e marcas superficiais. Quanto ao diâmetro dos canais, Manrich (2005) determina o cálculo da vazão de fluido refrigerante, que fornece o diâmetro da tubulação de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Relação entre diâmetros dos canais e vazão do fluido refrigerante (MANRICH, 2005)

Vazão do fluido (l/min)	3,8	9,5	38	85
Diâmetro do canal (mm)	8	11	19	23,8

Manrich (2005) determina que o comprimento dos tubos deve ser o maior possível para garantir bom resfriamento. Um método de cálculo é apresentado pela equação (5).

$$q_f = \frac{A\Delta T k}{e} \quad (5)$$

Sendo q_f o calor retirado pelo fluido refrigerante, e a distância dos canais à superfície do polímero, k a condutividade térmica do material do molde e A área útil dos canais. Se considerarmos A como sendo aproximadamente metade da área lateral total dos canais, temos a equação (6):

$$A = \frac{\pi d L}{2} \quad (6)$$

Aplicando a equação (6) em (5) e rearranjando em função de L, temos:

$$L = \frac{2eq_f}{\pi dk \Delta T} \quad (7)$$

Com essa equação é possível calcular o comprimento mínimo que garanta o resfriamento adequado da cavidade.

A

Tabela 4 apresenta valores comuns das propriedades térmicas e a densidade de materiais utilizados comercialmente na construção de moldes.

Tabela 4. Propriedades térmicas e densidade de materiais utilizados na fabricação de moldes (MANRICH, 2005)

Material	Condutividade térmica [W/mK]	Calor específico [J/kgK]	Densidade [kg/m ³]
Aço-ferramenta 420SS	25	462	7730
Aço-ferramenta P20	29	460	7800
Aço-ferramenta H13	29,5	462	7760
Aço-carbono	41	460	7833
C17200 (Be-Cu)	105	380	8350
B1 (Be-Cu)	130	420	8415
Alumínio A1	138	782	2800
Alumínio A1	138	782	2800
C18000 (Ni-Si-Cr-Cu)	207.6	404	8580

4.2.2 Posicionamento da tubulação

A posição da tubulação deve também ser determinada de forma a melhorar o resfriamento do polímero e garantir, principalmente, que ele ocorra de forma homogênea. Caso haja muita diferença na velocidade de resfriamento em diferentes pontos da peça, podem ocorrer concentrações de tensões que causam empenamento e deformação da peça. A Figura 16 ilustra exemplos de distribuição de canais e o efeito consequente na peça. A Figura 17 ilustra um exemplo da distribuição de temperaturas em função da distribuição de canais, para uma cavidade qualquer.

A Figura 18 ilustra um padrão para disposição dos canais, utilizado pela Plastic Omnium, em função do diâmetro destes canais. A Tabela 5 apresenta os valores do diâmetro, de A e de B apresentados na figura 10.



Figura 16. Exemplos de distribuição de canais de refrigeração ao redor da cavidade e seu efeito na formação da peça injetada. (SANTANA, 2008)

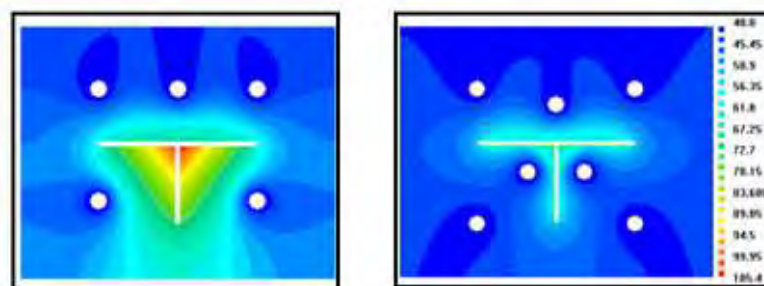


Figura 17. Distribuição da temperatura ao redor da cavidade de acordo com a distribuição dos canais de injeção. (SANTANA, 2008)

Manrich (2005) define também o posicionamento de canais em função do diâmetro destes, conforme apresentado na figura 18. De forma geral, quanto maior o diâmetro dos canais, maior a distância entre eles e em relação à cavidade, de forma a não gerar pontos com resfriamento excessivo que, como já foi mencionado, podem

comprometer a qualidade da peça. A Figura 19 ilustra a deformação de uma peça devido a concentração de calor no canto.

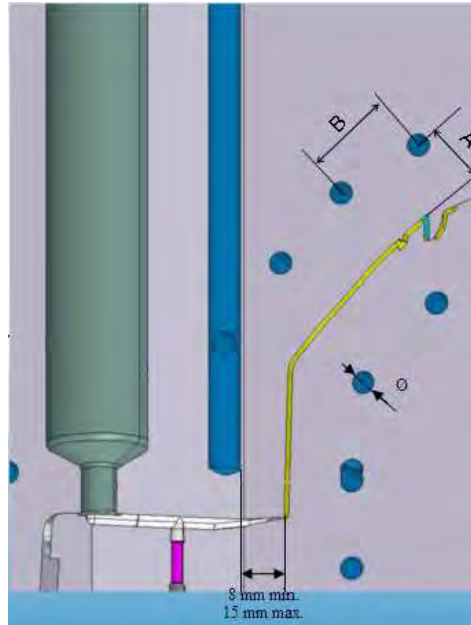


Figura 18. Padrão de construção do sistema de resfriamento de um molde. ((MOURA, 2011)

Tabela 5. Distância de tubos, entre si e com a cavidade, em função do diâmetro do tubo, em mm. (MOURA, 2011)

\varnothing	A	B
8	20 a 25	40 a 50
12	25 a 30	50 a 60
15	35 a 40	70 a 80

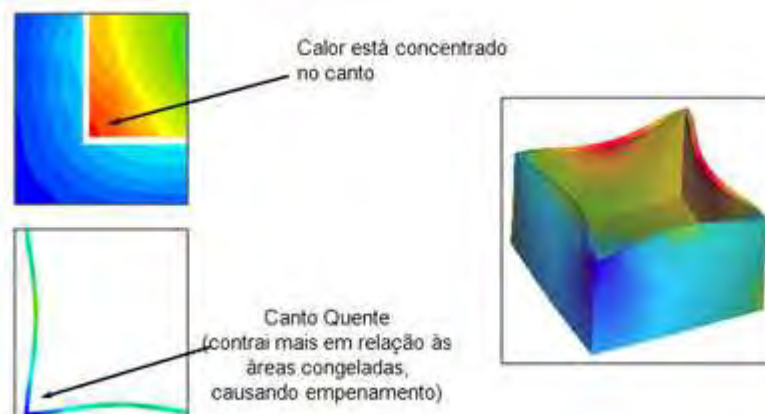


Figura 19. Deformação de uma peça por distribuição não uniforme do calor na cavidade. (SANTANA, 2008)

4.2.3 Vazão de fluido refrigerante

A vazão de fluido refrigerante deve ser estimada, de acordo com Manrich (2005), definindo-se o aumento de temperatura que o fluido deve sofrer durante a passagem pelo molde. Em geral, utiliza-se uma variação de 2 a 5°C. A vazão pode ser calculada pela equação (8).

$$\dot{m} = \frac{\dot{q}_f}{c_f \cdot \Delta T} \quad (8)$$

Onde c é o calor específico do fluido refrigerante, \dot{q}_f é o fluxo de calor pelo fluido e ΔT é a variação de temperatura fixada.

4.2.4 O escoamento do fluido refrigerante nos canais de refrigeração

Santana (2008) recomenda que o escoamento do fluido refrigerante se dê de forma turbulenta. Isso garante que a distribuição da temperatura dentro do fluido seja mais homogênea, garantindo melhor troca de calor com o fundido. A Figura 20 ilustra a diferença entre o gradiente de temperaturas para um escoamento laminar e outro turbulento. No escoamento laminar, há grande variação entre a temperatura da superfície do fluido e em seu interior. Por outro lado, no escoamento turbulento, o gradiente entre superfície e centro do escoamento é significativamente menor. Quanto mais turbulento o escoamento, mais homogênea a distribuição de temperaturas no fluido refrigerante.

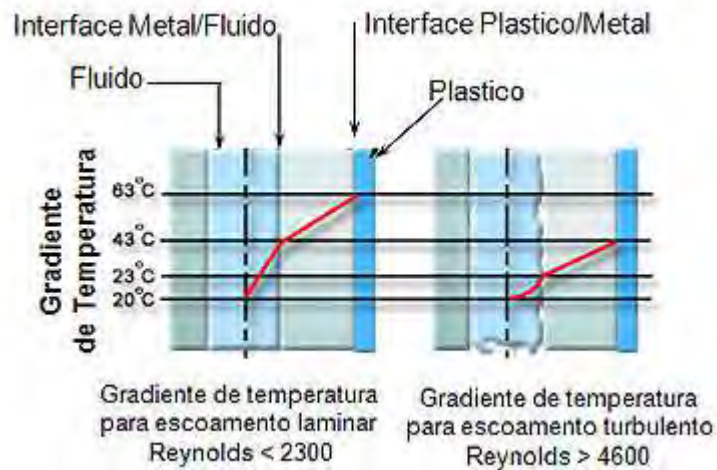


Figura 20. Gradiente de temperaturas em escoamento turbulento e laminar. (SANTANA, 2008)

4.3 O processo de resfriamento

O resfriamento do polímero se inicia imediatamente após a entrada deste na cavidade do molde, ao entrar em contato com as paredes da cavidade que estão submetidas à ação do sistema de resfriamento. É importante que a camada superficial do fundido, que está em contato com a cavidade, não se resfrie muito rapidamente, dificultando o preenchimento completo do molde.

O calor entra no molde através do polímero fundido e é perdido de várias formas: a mais significativa é a perda pelo calor trocado com o fluido refrigerante. Além dela, temos as perdas no molde por condução, convecção com o ar ambiente e por radiação (MANRICH, 2005). A Figura 21 ilustra esquematicamente essas trocas. Adota-se como positivo o calor recebido pelo molde (polímero fundido) e como negativo o calor cedido (fluido refrigerante e ambiente).

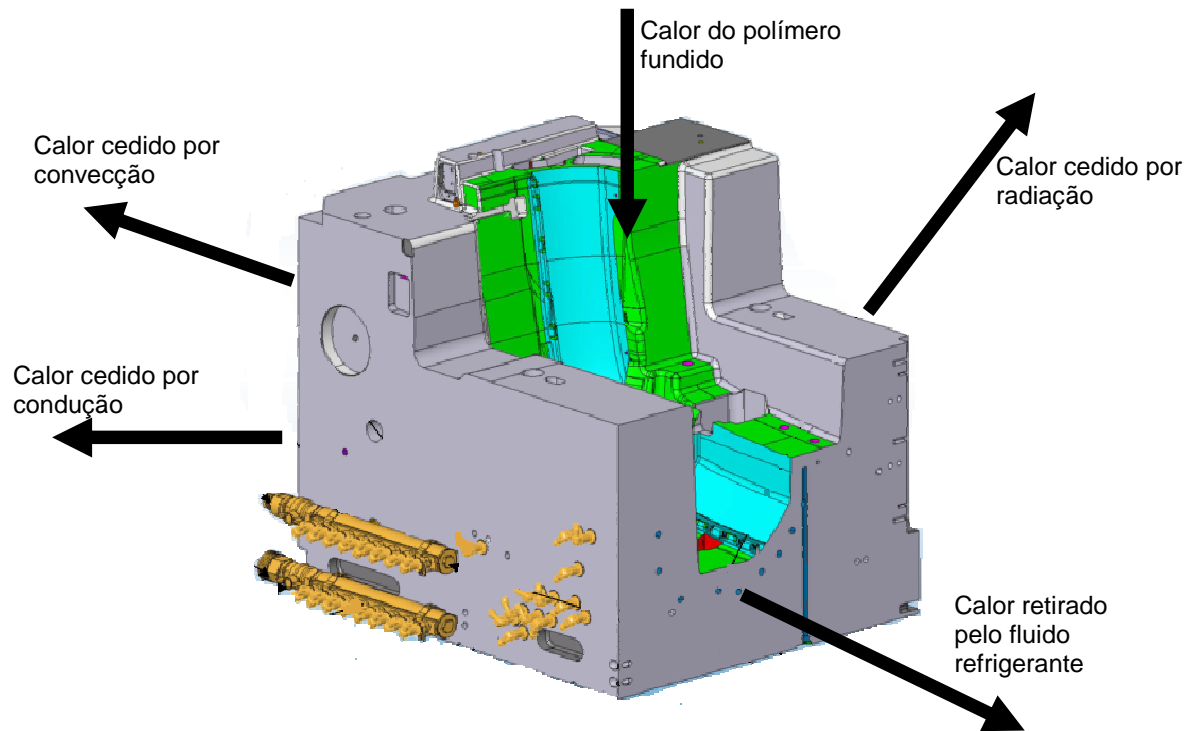


Figura 21. Esquema da troca de calor do molde com o fluido refrigerante e o meio-ambiente. (MOURA, 2001)

Incropera et. al. (2008) define uma metodologia para o cálculo dessas trocas de calor. Os cálculos do calor trocado por condução, convecção e radiação são definidos, respectivamente, pelas equações (9), (10) e (11).

$$q_k = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (9)$$

$$q_h = hA(T_s - T_\infty) \quad (10)$$

$$q_r = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (11)$$

Para a troca de calor da cavidade com o fluido refrigerante, Incropera et. al. (2008) apresenta uma metodologia que permite o cálculo da troca total entre polímero e fluido, considerando a condução pelo metal entre eles. A Figura 22 ilustra a situação.

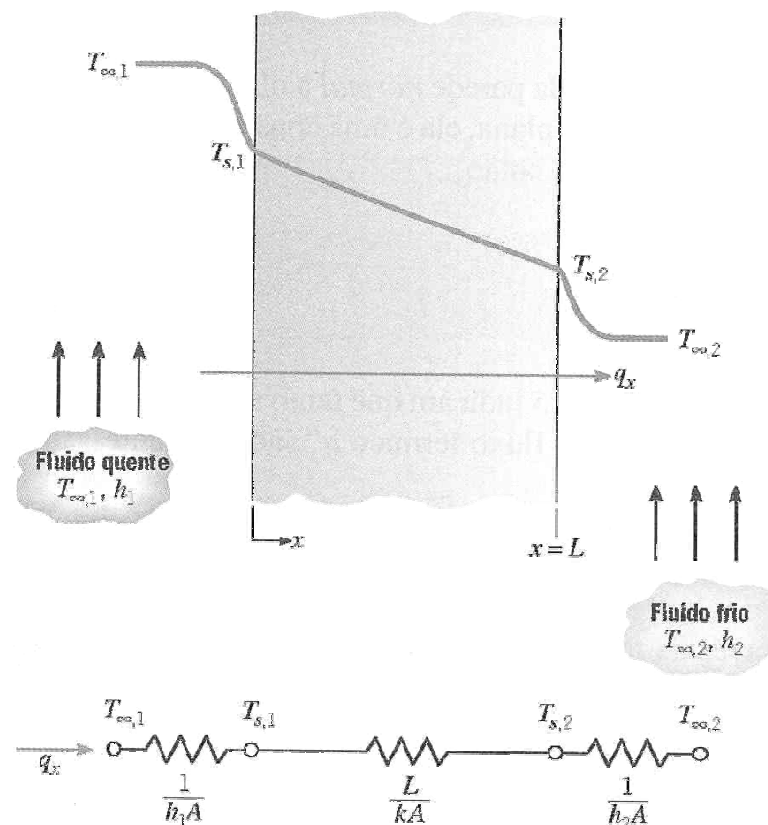


Figura 22. Esquema da troca de calor entre dois fluidos com um material sólido entre eles. (INCROPERA, 2008)

Se considerarmos que o fluido quente é o polímero fundido e o fluido frio é o refrigerante dentro de um canal, o sólido intermediário é o material do molde. Dessa forma, a troca de calor entre polímero e fluido se dá por convecção em ambos os lados e condução no material sólido, cujas resistências de troca são exibidas na Figura 22. O valor de condutividade térmica do material do molde, k , é facilmente obtido conhecendo-se o material. As áreas envolvidas são conhecidas sabendo-se o diâmetro e comprimento dos canais de refrigeração. A dificuldade do cálculo reside, portanto, na determinação dos coeficientes de convecção, h_1 e h_2 .

O cálculo de h_2 pode ser feito conhecendo-se os parâmetros do escoamento do fluido refrigerante e da dimensão da tubulação. O cálculo de h_1 , contudo, é o mais difícil, uma vez que o escoamento do polímero na cavidade se dá de maneira não-uniforme, sobre uma superfície irregular. Os processos são todos transientes, dado que o polímero inicia rapidamente seu resfriamento ao adentrar a cavidade e apresenta um gradiente considerável entre sua superfície e o interior do fluxo.

Manrich (2005) propõe um método simplificado para análise da troca de calor que é considerado satisfatório, embora induza a alguns erros. Adota-se as seguintes simplificações: flutuações desprezíveis de temperatura nos fluxos térmicos, processos quase-estáticos; valores médios para as propriedades durante os ciclos.

Mantendo a definição de que o calor que entra no molde é positivo e o calor cedido é negativo, tem-se a equação (12) para o calor total, definindo-o como a soma entre o calor do polímero fundido, o calor retirado pelo fluido e o calor perdido para o ambiente. O calor ambiente é fornecido pela equação (13) e definido como as perdas de calor no molde por condução pelas placas de fixação do molde; por convecção pela área lateral do molde e por radiação.

$$\sum q_i = q_f + q_p + q_{amb} = 0 \quad (12)$$

$$q_{amb} = q_k + q_h + q_r \quad (13)$$

Manrich (2005) define as fórmulas para calcular as perdas de calor para o ambiente:

- Condução, pela equação (14), onde A_{fix} é a área de contato do molde na máquina, β é o fator de proporcionalidade, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$, exemplificado na Tabela 6; e T_{amb} e T_{mol} são as temperaturas ambiente e do molde, respectivamente.

$$q_k = A_{fix} \cdot \beta \cdot (T_{amb} - T_{mol}) \quad (14)$$

- Convecção, pela equação (15), onde A_{lat} é a área exposta do molde e h é o coeficiente de transferência de calor para convecção.

$$q_h = A_{lat} \cdot h \cdot (T_{amb} - T_{mol}) \quad (15)$$

- Radiação, pela equação (16), onde ε é o fator de emissão, σ é o coeficiente de radiação para o corpo negro e θ_{amb} e θ_{mol} são as temperaturas absolutas (em K) do ambiente e do molde, respectivamente.

$$q_r = A_{lat} \cdot \varepsilon \cdot \sigma (\theta_{amb}^4 - \theta_{mol}^4) \quad (1617)$$

Tabela 6. Exemplos de fator de proporcionalidade para alguns materiais. (MANRICH, 2005)

Material	Aços de baixa liga	Aços de alta liga	Ligas de Cu
Fator β	100	80	20

O calor cedido pelo polímero fundido pode ser calculado pela equação (17), sabendo-se a massa de polímero injetada (m_p) e o calor específico (c_p) da mesma, para uma determinada temperatura de entrada e de saída para esse polímero. O termo t_c indica o tempo total em que o material está na cavidade do molde.

$$q_p = \frac{m_p \cdot c_p \cdot \Delta T}{t_c} \quad (1718)$$

Utilizando-se a equação (8), de posse desses valores é possível calcular a quantidade de calor trocada com o fluido refrigerante. Ainda, de forma análoga ao cálculo da quantidade de calor cedida pelo polímero, é possível calcular a taxa de troca de calor do fluido refrigerante, uma vez que se conheça sua vazão (\dot{m}_f), o calor específico (c_f) e a variação de temperatura (ΔT) entre entrada e saída do molde, como observado na equação (18).

$$q_f = \dot{m}_f \cdot c_f \cdot \Delta T \quad (19)$$

4.4 Defeitos em peças injetadas

Ao se produzir peças por injeção plástica, deseja-se obter peças de qualidade e com alto ritmo de produção. Contudo, são muitas as variáveis no processo de injeção e, raramente, um defeito é causado exclusivamente por um parâmetro. Via de regra, a qualidade de peças é resultado da combinação de máquina, molde e material. Um

molde que apresenta bom processo em uma máquina pode gerar peças ruins ou ciclos maiores em outra máquina, mesmo que semelhante. A troca ou mistura de material impacta também o processo e o molde pode apresentar problemas de desenho, fabricação, desgaste e outras tantas variáveis que levem a peças defeituosas. (HARADA, 2008)

Para qualquer defeito, há uma série de parâmetros de processo que podem ser alterados para corrigi-lo. O Anexo I apresenta uma tabela com vários possíveis defeitos e quais os parâmetros que os influenciam.

A seguir, na Tabela 7 à Tabela 16, são apresentados, de acordo com Harada (2008), para vários defeitos de injeção, os parâmetros de máquina, molde e material que os causam. Estão destacados os parâmetros relacionados às temperaturas de molde e máquina, e ao resfriamento dentro do molde.

Tabela 7. Parâmetros que causam injeções incompletas (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Pressão de injeção baixa	Temperatura do molde muito baixa	Fluxo muito lento
Temperatura de material baixa	Entradas muito pequenas	Resfriamento muito rápido

Tabela 7. Parâmetros que causam injeções incompletas

Bico ou cilindro obstruído	Bico do molde muito comprido	Tamanho das partículas não uniforme
Velocidade de injeção baixa	Diâmetro do bico muito pequeno	
Tempo de injeção pequeno	Canais muito pequenos	
Excesso de material entre rosca e bico	Saídas de ar insuficientes	Lubrificação inadequada
Diâmetro do bico pequeno	Seções muito finas no molde	Muita rebarba junto ao material virgem
Capacidade de máquina inadequada	Material frio entupindo as entradas	Material frio no funil

Tabela 8. Parâmetros que causam superfície opaca (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Pressão de injeção baixa	Temperatura do molde muito baixa	Fluxo muito lento
Temperatura de material baixa	Entradas muito pequenas	Lubrificação inadequada
Excesso de material entre rosca e bico	Saídas de ar insuficientes	Material frio no funil
Diâmetro do bico pequeno	Mudanças bruscas de espessura	Tamanho das partículas não uniforme
Tempo de intervalo entre as injeções muito pequeno	Nervuras muito grossas	
Tempo de injeção pequeno	Acabamento superficial inadequado	
Velocidade de injeção baixa		

Tabela 9. Parâmetros que causam manchas de queimado (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Pressão de injeção alta	Saídas de ar insuficientes	Fluxo muito rápido
Temperatura de material alta	Saídas de ar obstruídas	Excesso de lubrificante
Velocidade de rosca muito alta	Má colocação ou tipo inadequado de entrada	Conteúdo alto de voláteis
Bico muito quente	Excesso de agente desmoldante	

Contrapressão muito alta		
--------------------------	--	--

Tabela 10. Parâmetros que causam rechupe ou bolhas (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Pressão de injeção alta	Temperatura do molde muito baixa	Fluxo muito lento
Temperatura de material baixa	Entradas muito pequenas	Fluxo muito rápido
Bico de injeção frio	Saídas de ar insuficientes	Conteúdo alto de voláteis ou umidade
Diâmetro do bico pequeno	Canais pequenos	Lubrificação externa não uniforme
Tempo de intervalo entre as injeções muito pequeno	Diâmetro do bico muito pequeno	Excesso de material moído misturado com material virgem
Alimentação do material insuficiente	Bico do molde muito comprido	
Velocidade de injeção baixa		

Tabela 11. Parâmetros que causam marcas de junção (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Pressão de injeção baixa	Temperatura do molde muito baixa	Fluxo muito lento
Temperatura de injeção baixa	Entradas muito pequenas	Resfriamento muito rápido
Velocidade de injeção baixa	Saídas de ar insuficientes	Lubrificação insuficiente
Diâmetro do bico pequeno	Seções muito finas no molde	Conteúdo excessivo de voláteis

Capacidade de máquina inadequada	Saídas de ar obstruídas	Lubrificante em excesso
Bico muito frio	Bico do molde muito comprido	
Ciclo da máquina muito pequeno	Diâmetro do bico muito pequeno	
	Excesso de agente desmoldante	
	Má localização das entradas	
	Canais muito pequenos	

Tabela 12. Parâmetros que causam aderência no bico ou na cavidade (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Pressão de injeção alta	Temperatura do bico muito alta	Fluxo muito rápido
Temperatura de injeção alta	Encaixe imperfeito entre bico do molde e bico da máquina	Quantidade insuficiente de desmoldante
Velocidade de injeção alta	Diâmetro do bico do molde maior que do bico da máquina	Lubrificação insuficiente

Tabela 12. Parâmetros que causam aderência no bico ou na cavidade

	Mecanismo inadequado de extração	
	Cantos das cavidades alisadas na linha de separação do molde	
	Temperatura do bico muito alta	
Diâmetro do bico grande	Bico do molde muito	

	comprido ou pequeno	
Capacidade de máquina muito alta	Ângulo de bico inadequado	
Tempo de intervalo longo entre injeções	Riscos ou superfícies não polidas no molde	

Tabela 13. Parâmetros que causam marcas oblíquas e linhas prateadas (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Temperatura do bico muito alta	Temperatura do molde muito baixa	Umidade em excesso
Temperatura do material muito alta	Temperatura do molde não uniforme	Conteúdo excessivo de voláteis
Velocidade de injeção alta	Diâmetro do bico do molde muito pequeno	Material frio no funil
Diâmetro do bico pequeno	Saídas de ar insuficientes	Contaminação com materiais incompatíveis
Capacidade de máquina insuficiente	Entradas e canais muito pequenos	Excesso de material moído misturado com material virgem
Limpeza do cilindro inadequada (contaminação com o material anterior)	Óleo, graxa, lubrificante ou água no molde	

Tabela 13. Parâmetros que causam marcas oblíquas e linhas prateadas

Temperatura na zona traseira do cilindro muito alta		
Mau funcionamento das resistências do cilindro		

Tabela 14. Parâmetros que causam rebarbas na peça (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Pressão de injeção muito	Temperatura do molde	Fluxo excessivo

alta	 muito alta	
Temperatura do material muito alta	Alinhamento falho entre as duas partes	Lubrificante em excesso ou mal distribuído
Velocidade da rosca alta	Material estranho nas faces do molde ou na linha de separação	Tamanho pequeno ou não uniforme dos grãos
Velocidade do pistão muito alta	Número excessivo de cavidades	
Pressão de fechamento inadequada	Área projetada do molde muito grande para capacidade da máquina	
Ciclo muito longo	Saídas de ar muito aprofundadas	
Contrapressão excessiva		
Excesso de material entre a rosca e o bico		

Tabela 15. Parâmetros que causam manchas pretas ou degradação da cor (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Temperatura na zona traseira do cilindro muito alta	Graxa ou óleo nas cavidades	Excesso de material volátil

Tabela 15. Parâmetros que causam manchas pretas ou degradação da cor

Bico colocado de forma errada		Contaminação
Torpedo ou cilindro rachados		
Pistão gasto		
Vazamento de óleo no cilindro		
Resistências do cilindro		

desreguladas		
Temperatura do material muito alta	Graxa saindo dos pinos	Excesso de pó
Temperatura do torpedo interno muito alta	Canais muito quentes	Lubrificante em excesso ou mal distribuído
Material queimado preso no cilindro ou bico		Excesso de material moído misturado com material virgem

Tabela 16. Parâmetros que causam deformação ou contrações excessivas (HARADA, 2008)

Máquina	Molde	Material
Temperatura material muito baixa	Conicidade insuficiente	Fluxo muito rápido
Temperatura do material muito alta	Extração do macho deficiente	Lubrificante em excesso ou não uniforme
Tempo de intervalo entre as injeções reduzido	Pinos extratores com funcionamento muito rápido ou não uniforme	Solidificação lenta
Ciclo muito curto	Temperatura no molde não uniforme	
Máquina abrindo ou pinos atuando de forma rápida	Temperatura no molde muito baixa	

Tabela 16. Parâmetros que causam deformação ou contrações excessivas

	Temperatura no molde muito alta	
	Espessura das peças não uniforme	

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Plastic Omnium do Brasil, situada em Taubaté, produz uma grande diversidade de peças plásticas por injeção, a maior parte delas passando pelo processo subsequente de pintura. Atualmente, são cerca de 20 moldes em produção de vida-série, com outros vários para peças de reposição e moldes de novos projetos a caminho. Para facilitar a análise e se ter uma única medida de comparação, foi escolhido um único produto, o pára-choque dianteiro do Gol NF, da Volkswagen, injetado em uma mesma máquina, a Husky 2700t.

5.1 Volkswagen 23x – Gol NF

A Plastic Omnium produz o pára-choque dianteiro do Gol Geração 5, conhecido internamente como NF. Foi escolhido esse produto por ser o de maior volume de produção, de forma que possui uma máquina dedicada à sua produção, sem trocas de molde, rodando 24 horas por dia durante a semana e em sábados alternados. A Volkswagen monta, em média, 1.050 carros por dia. A injeção do NF ocorre com tempo de ciclo de 61 segundos, ou seja, produção de 59 peças por hora.

A Figura 23 apresenta uma pele injetada do NF, antes da pintura e montagem final.



Figura 23. Pele injetada do Volkswagen Gol NF 23X (MOURA, 2011)

5.2 A máquina injetora – Husky 2700t

O produto é injetado em uma máquina da marca Husky com capacidade de 2.700t. Essa capacidade representa a pressão de fechamento que a máquina aplica sobre o molde, ou seja, 2.700t/cm². A Figura 24 apresenta a máquina instalada na planta.



Figura 24. Máquina injetora Husky de 2700t (MOURA, 2011)

5.3 Dados do processo e do material

A Tabela 17 apresenta os dados coletados na planta para o processo de injeção do NF na Husky 2.700t.

Tabela 17. Dados coletados do processo de injeção do NF 23X . (MOURA, 2011)

Temperatura da água de refrigeração	Entrada = 9°C Saída = 12°C
Temperatura do polímero (PP)	Entrada = 220°C Saída = 40°C
Tempo de ciclo	61 segundos

Tempo de injeção	35 segundos
Massa de polímero por ciclo	4,32 kg
Fator β para aço de alta liga	80 W/m ² K
Área de fixação do molde	2,6 m ²
Área lateral do molde	3,2 m ²
Fator de convecção livre no ar	~15 W/m ² K
Temperatura média do molde	40°C
Calor específico médio do polímero durante o processo	2,35 kJ/kgK
Circuitos de refrigeração no molde	21
Tubulação do sistema de refrigeração do molde	11 mm
Vazão de água no sistema de refrigeração para cada circuito (determinado pela tubulação)	~ 9,5 L/min

As temperaturas da água são medidas antes e após o molde, em tempo real, na própria máquina. A temperatura de entrada do polímero é aquela no bico de injeção, logo antes de preencher a cavidade do molde. Durante o ciclo de injeção, ainda na rosca, o polímero atinge temperaturas maiores, na casa de 240°C. A temperatura de saída do polímero é aquela da peça acabada, numa temperatura que permita que a peça chegue até o operador aceitável para o manuseio, sem oferecer riscos. O tempo de ciclo é característico desse molde, nessa máquina. Se o molde é colocado em outra máquina, esse valor pode sofrer alterações significativas. O tempo de injeção é aquele em que o polímero está efetivamente dentro da cavidade, desde o início da injeção, o recalque e o tempo de resfriamento. O restante do tempo de ciclo é abertura e fechamento de molde, e extração da peça. Por fim, a massa do produto é especificação de projeto e é controlada pesando-se uma peça por hora para garantir que está dentro do especificado.

Para o calor específico do polipropileno, Santos (2005) fez um estudo para determinar os valores dentro da faixa de temperaturas usual do processo de injeção,

cujo resultado encontra-se na Figura 25. Seguindo as recomendações de Manrich (2005), será utilizado o valor médio durante o processo, que é 2,35 kJ/kgK.

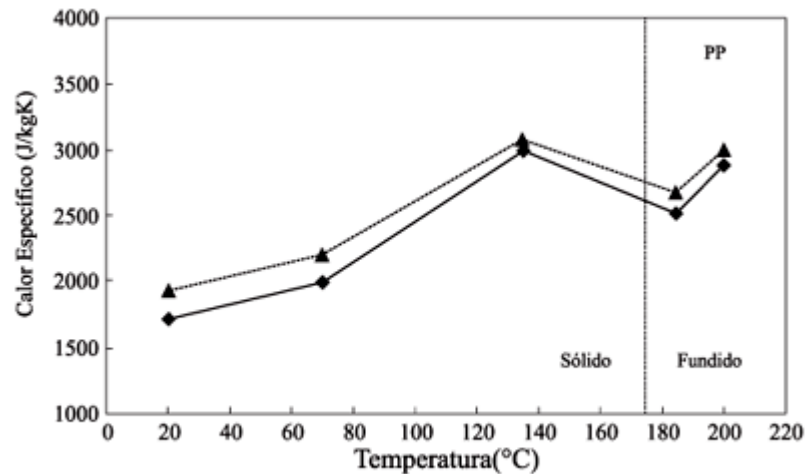


Figura 7. Calor específico: polímeros semi-cristalinos.

Figura 25. Variação do calor específico do polipropileno para a faixa de temperaturas do processo de injeção. (SANTOS, 2005)

5.4 Determinação das trocas de calor no molde e da vazão do sistema refrigerante

Com base nos dados da Tabela 17, podemos calcular o calor trazido pelo polímero, de acordo com a equação (17):

$$q_p = \frac{m_p \cdot c_p \cdot \Delta T}{t_c} = \frac{4,32 \cdot 2,35 \cdot (220 - 40)}{40} = 45,68 \text{ kW}$$

A equação (14) determina o calor que o molde perde por condução. Foi considerada a temperatura média do polímero no processo como sendo a temperatura do molde:

$$q_k = A_{fix} \cdot \beta \cdot (T_{amb} - T_{mol}) = 2,16 \cdot 80 \cdot (25 - 40) = -2,59 \text{ kW}$$

A equação (15) determina a perda de calor por convecção:

$$q_h = A_{lat} \cdot h \cdot (T_{amb} - T_{mol}) = 3,2 \cdot 15 \cdot (25 - 40) = -0,72 \text{ kW}$$

A equação (16) determina a perda de calor por radiação:

$$q_r = A_{lat} \cdot \varepsilon \cdot \sigma (\theta_{amb}^4 - \theta_{mol}^4) = 3,2 \cdot 0,25 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} (25^4 - 40^4) = -1,00 \cdot 10^{-4} kW$$

Assim, aplicando-se a equação XX, sabemos o calor removido pelo sistema de refrigeração:

$$\sum q_i = q_f + q_p + q_{amb} = 0$$

$$q_f = -q_p - q_{amb} = -45,68 - (-2,59 - 0,72 - 0,0001) = -42,37 kW$$

De posse desse valor, podemos aplicar a equação (18) para determinar a vazão de água no sistema de refrigeração:

$$q_f = \dot{m}_f \cdot c_f \cdot \Delta T$$

$$\dot{m}_f = \frac{q_f}{c_f \cdot \Delta T} = -\frac{-42,37}{4,184(9-12)} = 3,38 kg/s$$

A equação (19) nos dá a vazão em m³/s, que é convertida em L/min:

$$Q = \frac{\dot{m}_f}{\rho_{H_2O}} = \frac{3,38}{999,7} = 3,38 \times 10^{-3} m^3/s = 202,61 L/min \quad (19)$$

Como são, ao todo, 21 circuitos de refrigeração no molde, temos uma vazão de aproximadamente 9,65 L/min em cada circuito. Essa vazão aproxima-se bem à vazão recomendada por Manrich (2005) para tubulações de 11 mm, como apresentado na Tabela 3.

Por outro lado, em alguns moldes mais recentes, a Plastic Omnium padronizou a vazão em 1.600 L/h, por circuito. Esse valor é consideravelmente maior que o

encontrado, na casa de 580 L/h. Esses valores são empíricos e determinados de acordo com o formato da peça e a distribuição da refrigeração no molde, variáveis que podem levar à maior necessidade de vazão.

6 CONCLUSÃO

O processo de injeção plástica por moldagem possui inúmeras variáveis que impactam a produção de diversas formas, seja na qualidade, seja na produtividade. Dentre todos os parâmetros associados, a refrigeração adequada do molde figura entre os mais importantes, uma vez que é responsável pelo tempo de ciclo total de produção e a qualidade da peça final.

A troca de calor no sistema de refrigeração é complexa, principalmente a convecção do lado do polímero, que ocorre em um fluxo entre paredes finas, sobre uma superfície irregular, com variação brusca de temperatura. O método simplificado apresentado, contudo, embora induza a erros, permite uma aproximação eficaz da vazão necessário, como comprovado nos cálculos. A determinação em projeto, todavia, não deixa de ser empírica e baseada em padrões determinados por fabricante. O uso de programas de simulação, como o MoldFlow, é o padrão na indústria. Dessa forma, o cálculo apresentado tem mais validade em projetos simples, ou como validação dos dados determinados empiricamente.

Para o projeto, inúmeras são as variáveis que podem impactar na definição da vazão de fluido refrigerante e no dimensionamento da tubulação. Cada produto é um caso específico, com sua geometria característica e fluxo diferenciado do polímero na cavidade, que pode exigir uma refrigeração mais intensa num ou noutro ponto. Os valores de referência de 1.600 L/h apresentados são para um projeto mais recente, de outro modelo de peça, que talvez não se aplique tão bem ao molde do NF.

Em suma, o cálculo teórico preciso é bastante complexo, e o projeto deve ser abordado caso a caso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião V.. **Ciência dos Polímeros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 280 p.

HARADA, Júlio. **Moldes para injeção de termoplásticos: projetos e princípios básicos**. São Paulo: Artliber, 2008. 308 p.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos**. São Paulo: Artliber, 2005. 431 p.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. São Paulo: Ltc, 2008. 698 p.

GOU, Gang et al. Online measurement of rheological properties of polypropylene based on an injection molding machine to simulate injection-molding process. **Polymer Testing**, Pequim, n., p.826-832, 28 jun. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941811001279>>. Acesso em: 10 nov. 2011.

BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E.. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 659 p.

SANTOS, Wilson N. **Aplicação da técnica de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros fundidos**. 2005. 15 f. Artigo (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.